

## 多轨道准直式红外地球模拟器结构设计

陈启梦<sup>1,2,3</sup>, 张国玉<sup>1,2,3</sup>, 王哲<sup>1</sup>, 张健<sup>1</sup>

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 光电测控与光电信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;
3. 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为解决红外地球敏感器地面性能测试实验中需要模拟多种地球张角的现实问题, 文中利用准直光学系统模拟目标, 对多轨道红外地球模拟的技术进行了深入研究。提出一种可变地球张角模拟的总体方案, 并对模拟器各关键部分准直透镜、可变地球光阑等进行了详细的光机结构设计, 给出了设计结果和设计方法。针对地球模拟器地球张角检测的需求, 还提出一种地球张角检测方法, 搭建了检测装置, 并对模拟的不同轨道对应的地球张角进行了实测, 结果表明: 对应于 18 000、35 786、42 000 km 三种轨道高度的地球张角模拟精度均优于 $\pm 0.05^\circ$ , 完全符合对红外地球敏感器的标定要求。

**关键词:** 地球敏感器; 可变光阑; 结构设计; 热力学分析

**中图分类号:** V556.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1204004

## Structure design of multi-track collimating infrared earth simulator

Chen Qimeng<sup>1,2,3</sup>, Zhang Guoyu<sup>1,2,3</sup>, Wang Zhe<sup>1</sup>, Zhang Jian<sup>1</sup>

- (1. Department of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Key Laboratory of Optical Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun 130022, China;
3. Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instrumentation, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The infrared earth sensor is a pose measuring component located on man-made earth satellite for measuring the attitude deviation between the satellite body and the earth. And the collimating infrared earth simulator is the main demarcating device for testing high orbit satellite infrared earth sensor on the ground. In order to solve the practical problem, it is needed to simulate a variety of earth angles during the earth sensor ground performance test. A multi-track infrared earth simulation technology was studied deeply by using a collimating optical system to simulate the target. A general scheme of simulating variable earth angles was proposed, the optical and mechanical structure design methods of key parts on the simulator such as the germanium lens optical system and the variable earth aperture were illustrated in detail. Aiming at the requirement of detection of earth angles, a method of detecting earth angles was also proposed. A detection device was set up, and the simulated earth angles under different tracks were

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 国家公益性行业科技专项(GYHY200706003, GYHY201006043)

作者简介: 陈启梦(1989-), 女, 讲师, 博士, 主要从事航天器地面模拟与标定技术方面的研究。Email: qmchen1989@163.com

measured actually. The test results show that the simulation accuracy of each earth angle corresponding to orbit altitude 18 000, 35 786, 42 000 km is better than  $\pm 0.05^\circ$ , which can be fully in line with the calibration requirements of the earth sensor.

**Key words:** earth sensor; variable aperture; structure design; thermodynamics analysis

## 0 引言

红外地球敏感器是深空导航姿态测量的重要部件之一, 红外地球模拟器作为对地球敏感器进行地面性能测试的核心设备, 其发展水平直接影响高精度地球敏感器的进一步研制<sup>[1-4]</sup>。准直式红外地球模拟器的功能是在地面上模拟不同轨道高度卫星在太空中所看到的地球, 模拟地球辐射特性的工作状态, 即模拟卫星在太空中观测到的不同轨道高度的地球及其辐射特性, 通过对地球张角的模拟以及将红外基准转换为可见光基准, 并依靠地球模拟器张角的大小来标定红外地球敏感器的滚动与俯仰偏差, 从而实现红外地球敏感器的质量考核、地面性能测试和精度标定。

2000 年以来, 国内外研制的红外地球模拟器, 如法国 MATRA 公司、意大利伽利略公司以及国内北京控制工程研究所研制和使用的均是同步轨道地球模拟器<sup>[5-8]</sup>, 只能模拟卫星在同步轨道上看到的地球, 模拟一种地球张角, 即卫星处于地球同步轨道上, 距地面的高度约为 35 786 km, 地球张角为  $17.46^\circ$ , 无法进行超同步轨道的标定试验。

但是近年来随着深空导航的蓬勃发展, 国外已采用卫星发射时远地点达 10 万公里以上的大椭圆轨, 这使得红外地球敏感器的飞行区域不再局限于同步轨道, 而是扩大到同步轨道之上、下一定的区域<sup>[9-11]</sup>, 因此, 只能模拟同步轨道下地球张角的地球模拟器很难满足红外地球敏感器地面测试的功能需求, 研制一种可变张角的红外地球模拟器已成为必然趋势。

为此, 文中基于三种轨道高度卫星对应的红外地球敏感器地面性能测试需求, 针对一种可变张角的多轨道准直式红外地球模拟器进行研究, 通过更换地球光阑, 模拟变化的地球张角; 地球模拟器主要通过地球张角的大小来标定敏感器的滚动与俯仰偏差, 文中提出的张角标定技术可以解决地球模拟器的标定问

题, 从而解决卫星姿态测量精度的实际问题。

## 1 地球模拟器结构及工作原理

### 1.1 模拟器结构

多轨道准直式红外地球模拟器由地球模拟器本体、加热与制冷温控系统、高精度多维平移回转机构、底座与地面支撑等四部分组成, 如图 1 所示。

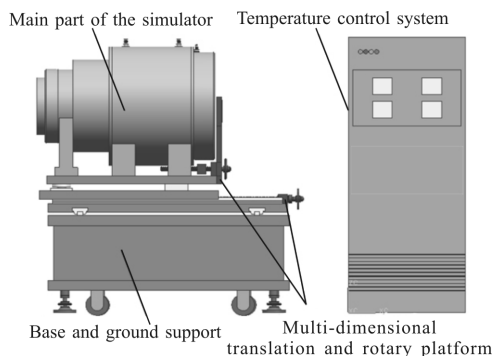


图 1 地球模拟器结构仿真图

Fig.1 Structure simulation of the earth simulator

### 1.2 模拟器的工作原理

地球模拟器对地球张角的模拟主要通过模拟器本体实现, 其本体主要包括锗准直透镜组、水冷式地球光阑及其调整支架、热地球及其支架、光轴基准镜等部分组成。工作原理如图 2 所示: 将用来模拟地球张角大小的地球光阑放置在锗准直透镜组的焦平面

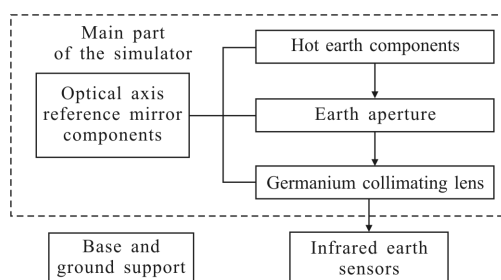


图 2 地球模拟器工作原理图

Fig.2 Working principle of the earth simulator

附近,使入射至地球敏感器的光线为平行光,地球光阑的轴向位置可以根据光学系统的像差进行调整,地球光阑后边的热地球,用来模拟地球表面的热辐射特性;光轴基准镜组件原则上垂直固定在大底座的后侧端面上,要求基准镜的中心十字同轴于准直透镜的光轴,基准镜的法线平行于准直透镜的光轴。

## 2 地球模拟器设计方案

### 2.1 设计内容

根据地球模拟器技术指标对模拟器的设计要求,多轨道准直式地球模拟器的光机系统关键技术参数如表 1 所示。

表 1 地球模拟器技术指标

Tab.1 Technical indicators of the earth simulator

Specifications	Indicator requirements
Effective aperture	$\leq \Phi 240$ mm
Spectral range	14-16.25 $\mu\text{m}$ (Center wavelength 15.125 $\mu\text{m}$ )
Earth angle error	$\geq \pm 0.05^\circ$
Earth angle of simulation	30.42°(Track height: 18 000 km)
	17.46°(Track height: 35 786 km)
	15.19°(Track height: 42 000 km)

所设计的多轨道准直式红外地球模拟器具有地球光阑可更换的特点,为减少测试中光阑更换过程对光学系统的影响,采用地球光阑组件与锗准直透镜组件分体的机构形式,将二者分别固定在各自的支撑座上,联接组件为水冷式背景筒体。考虑到地球光阑沿轴调整等的需要,底座上放置一个高精度导轨,便于读取光阑的移动距离拟。地球模拟器重要组件分体的设计方案,不但保证了其工作稳定性,控制了其整体精度,使测试结果具有可靠性,还达到了设备便于运输与装调的目的。

### 2.2 锗准直透镜光学系统设计

锗准直透镜是红外地球模拟器实现测试功能的核心组成,用于模拟无穷远处的地球辐射<sup>[12]</sup>。地球模拟器工作时,将地球光阑的位置调整到锗准直透镜弥散斑最小的像面处,地球敏感器接收经模拟器光学系统出射的平行光线。根据各轨道高度观测的具体信息,确定锗准直透镜不同视场角对应的弥散斑最小的像面位置,从而使模拟器精确有效地模拟地球张角,使地球敏感器更逼近其在空间轨道的工作

状态。

#### 2.2.1 锗准直透镜参数确定

根据技术指标对通光孔径的要求,在焦距相同的条件下,从像差角度考虑,锗准直透镜选用弯月型面型,利于校正球差获得最小弥散斑。

由于地球传感器的工作波段在中心波长  $\lambda_0=15.125$  mm 时,认为取锗单晶材料  $n \approx 4.001366$  计算最合理。根据吸收率和透过率公式(1)、(2)以及光学加工的可行性,计算得到设计的锗准直透镜中心厚度  $d=20$  mm,此时,锗对中心波长吸收率为 50.31%、透过率为 12.35%,有利于提高红外光学系统的光学效率降低光能损失。

$$A=(1-\gamma)\frac{1-e^{-ad}}{1-\gamma e^{-ad}} \quad (1)$$

$$T=\frac{(1-\gamma)^2 e^{ad}}{1-\gamma^2 e^{-2ad}} \quad (2)$$

式中: $\gamma=\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$  为反射系数; $n$  为折射率; $a$  为与波长有关的吸收系数; $d$  为锗的厚度。

#### 2.2.2 锗准直透镜设计结果

锗准直透镜曲率半径和焦距的确定受到地球模拟器总体结构设计要求的限制,按弯月型透镜的最小球差公式:

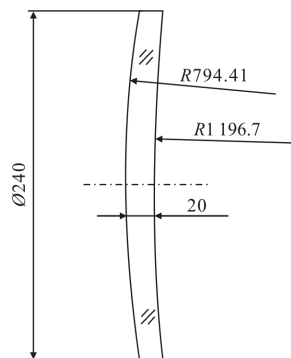
$$r_1:r_2=(4+n-2n^2):(n+2n^2) \quad (3)$$

求得  $r_1:r_2=2:3$ 。经过分析计算,确定锗准直透镜的曲率半径  $r_1=794.41$  mm,  $r_2=1196.7$  mm。

当中心厚度  $d=20$  mm 时,由焦距计算公式:

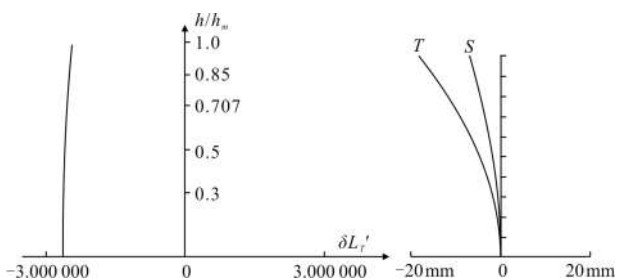
$$\frac{1}{f'}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)+\frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2} \quad (4)$$

得到焦距  $f'=750.75$  mm。锗准直透镜设计结果及不同地球张角下透镜的球差、场曲如图 3 所示。



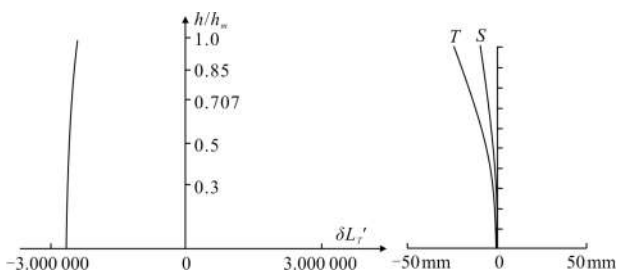
(a) 锗准直透镜设计结果

(a) Design results of germanium collimating lens



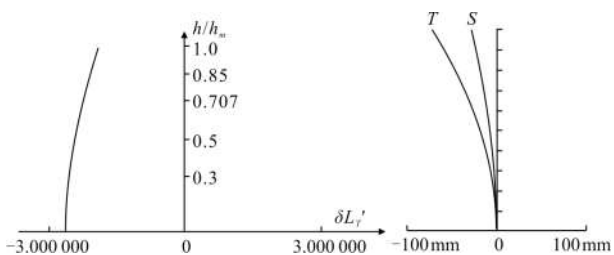
(b)  $2\omega=15.19^\circ$  视场轴外子午球差、场曲曲线

(b) Spherical aberration, field curvature of  $2\omega=15.19^\circ$



(c)  $2\omega=17.46^\circ$  视场轴外子午球差、场曲曲线

(c) Spherical aberration, field curvature of  $2\omega=17.46^\circ$



(d)  $2\omega=30.42^\circ$  视场轴外子午球差、场曲曲线

(d) Spherical aberration, field curvature of  $2\omega=30.42^\circ$

图 3 锗镜设计结果及不同地球张角下透镜的球差、场曲

Fig.3 Design results of germanium lens and spherical aberration, field curvature under different earth angles

2.2.3 可变地球光阑位置与直径的确定

三种轨道下地球光阑位置和直径通过边缘光线进行求解，得到三个视场角下最佳像面的位置和弥散斑大小，从而确定可变地球光阑位置与直径，如表 2 所示。

表 2 地球光阑位置和直径

Tab.2 Positions and diameters of earth apertures

Earth angle/( $^\circ$ )	Diameters of earth apertures/mm	Positions of earth apertures/mm
30.42	443.28	706.66
17.46	242.44	716.06
15.19	209.63	720.62

2.3 地球模拟器机械结构设计

地球模拟器机械结构关键部件包括准直透镜组的机械结构、水冷式地球光阑的机械结构和热地球的机械结构设计。

2.3.1 准直透镜组的机械结构设计

对准直透镜组进行机械结构设计时，重点要考虑锗镜定位的稳定性和装调的可行性，为此设计的机械结构如图 4 所示。

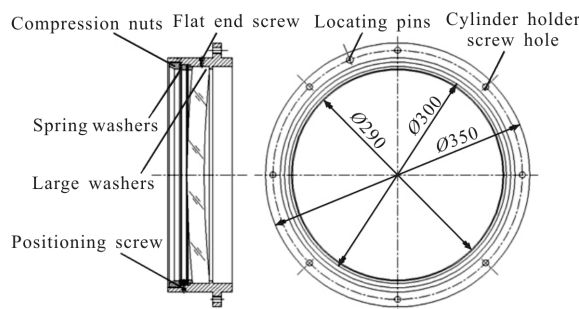


图 4 锗准直透镜组的机械结构

Fig.4 Mechanical structure of the germanium collimating lens system

设计时考虑到锗准直透镜外形尺寸大、机械强度差和使用温度变化等诸多因素的影响，若在装调中使用普通垫片会使得透镜受力不均，使透镜崩边，所以采用弹性调整垫圈，使用压圈紧固，这样便可以达到在装配时受力均匀、不损坏透镜的目的。在准直镜座上靠近前端面设有径向微调机构，以实现准直透镜的光轴调整。

2.3.2 水冷式地球光阑的机械结构设计

地球光阑是红外地球模拟器的关键部件，其作用是模拟人造卫星处于太空中不同轨道时获得的地球张角和热辐射特性，工作后通过水冷方式进行冷却。文中所设计的可变光阑如图 5 所示，采用平板式

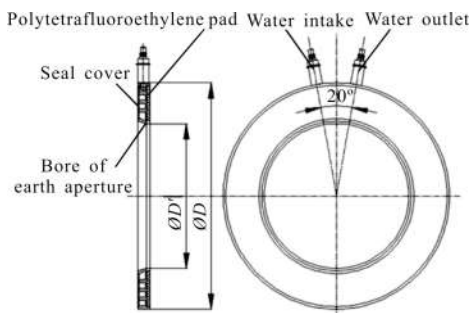


图 5 地球光阑结构图

Fig.5 Structure diagram of the earth aperture

设计方案,并且进、出水口采用弯头连接与光阑板并成一体,在使用和更换光阑板时,无须更换进出水口,从而使更换光阑简单易行。

### 2.3.3 热地球的机械结构设计

文中所设计的热地球结构如图 6 所示,地球金属圆盘的材料为铝,对其表面进行黑色阳极氧化处理,这样做可消除杂散光对对准直透镜的影响,使金属圆盘表面具有很高的辐射率;金属圆盘加热方式为其背部用电热膜加热,温度在+40~+95℃范围内连续可调,实现对地球与太空辐射亮度差的模拟;耐高温隔热石棉起到保温的作用;铝板圆盘中心位置由热敏电阻测温元器件采集圆盘加热温度,经由控制系统准确调节电加热膜的加热温度,使得整个热地球表面受热均匀稳定。

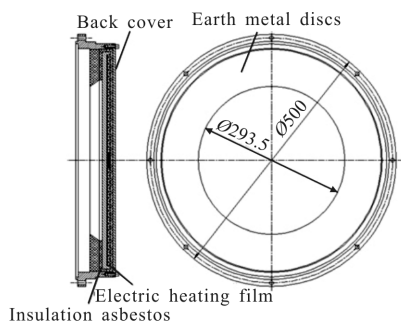


图 6 热地球结构图

Fig.6 Structure diagram of the hot earth

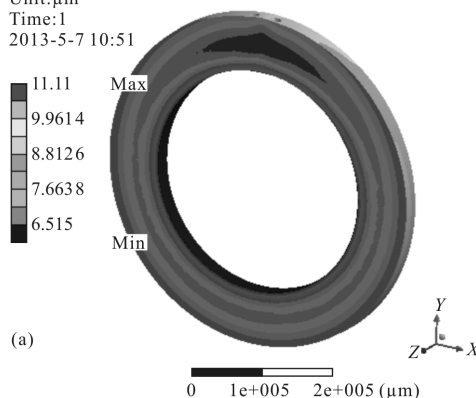
### 2.4 机械结构热力学分析

由于可变光阑在地面测试工作进行时持续受热载荷的影响,根据热应力及热膨胀原理可知,其必然产生形变,从而直接影响地球敏感器精度标定的可靠性。因此文中重点对可变光阑进行热-结构耦合分析,模拟+40~+95℃情况下可变光阑的变形情况,以17.46°地球张角对应的可变光阑为例具体分析。

设定参考温度为+22℃(常温),对地球光阑孔径内圆表面分别施加+40℃的温度载荷以及+95℃的温度载荷,由温度引起的变形如图 7 所示。

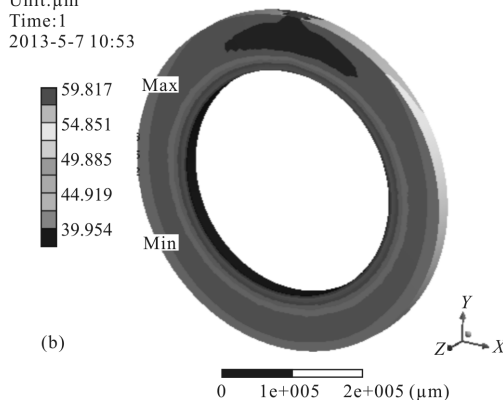
运用同样的方法,得到三种地球张角对应的可变光阑的热力学分析结果。进而根据热-结构耦合分析得到的数据,对像高重新设置进行光线追迹计算,结果表明:在模拟温度区间内,地球光阑内孔直径变化对从地球光阑出射光束的角度平行度基本无影响,即完全满足地球张角模拟的精度要求。

C:static structural(ANSYS)  
Total deformation  
Type:total deformation  
Unit:μm  
Time:1  
2013-5-7 10:51



(a)

C:static structural(ANSYS)  
Total deformation  
Type:total deformation  
Unit:μm  
Time:1  
2013-5-7 10:53



(b)

图 7 可变光阑的变形云图

Fig.7 Deformation cloud map of the variable aperture

## 3 地球张角检测方法及其测试结果

### 3.1 检测装置

地球张角检测装置总体结构如图 8 所示。

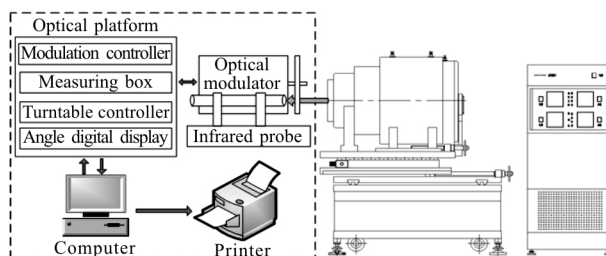


图 8 地球张角测试装置总体布局图

Fig.8 Overall layout of the earth angle test device

其中,小视场红外探头是用来测试张角的核心器件部件,其精度为0.01°,满足对模拟器所模拟地

球张角的标定要求。红外探头可以测量地球张角的辐射输出,当探头对准方向发生变化,扫过可变光阑将会得到梯形波,梯形波斜边的中点对应所模拟地球的弦宽,从而可以计算出不同轨道下的地球张角。

具体测试方法如图 9 所示:调整小视场红外探头的光轴与地球模拟器的光轴重合,即使小视场红外探头的光轴方向对准地心;通过计算机控制(或手动)两轴转台,使滚动轴处于垂直方向、俯仰轴处于水平方向,然后旋转俯仰轴,使小视场红外探头扫视被测地球模拟器的地球,并记录地球辐射和俯仰轴的转角,用同样的方法可以记录地球滚动轴的转角,从而完成对地球张角的测定。

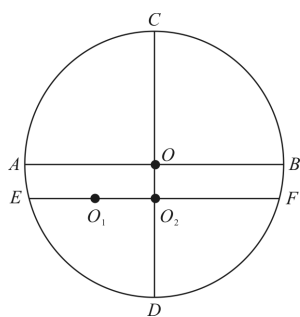


图 9 地心坐标调整方法

Fig.9 Adjustment method of geocentric coordinate

### 3.2 地球张角测试结果

表 3 所示是利用上述地球张角检测装置进行测试的实验结果,取相对辐射能量的 50%作为地球的边界,将地球张角的实测值与理论值相比较,确定对红外地球敏感器的标定精度。

表 3 地球张角实测结果

Tab.3 Actual test results of earth angle

Track height /km	Theoretical value of earth angle/(°)	Measured value of earth angle/(°)	Error/(°)
42 000	15.19	Pitching: 15.18	-0.01
		Roll angle: 15.23	+0.04
35 786	17.46	Pitching: 17.43	-0.03
		Roll angle: 17.48	+0.02
18 000	30.42	Pitching: 30.40	-0.02
		Roll angle: 30.37	-0.05

从表 3 可以看出,模拟的地球张角最大误差为 0.05°,满足张角误差  $\leq \pm 0.05^\circ$  的技术指标要求。

## 4 结论

红外地球模拟器是用于卫星姿态测量关键部件——红外地球敏感器研制中的一项重要地面模拟试验和精度标定设备。文中从深空导航红外地球敏感器地面性能测试的需要出发,根据总体设计要求和设计指标,设计了一种多轨道准直式红外地球模拟器,实现了三种轨道高度下对多地球张角模拟精度均小于  $\pm 0.05^\circ$  的使用要求。介绍了地球模拟器的组成和工作原理,详细研究了锗准直透镜的设计方法,给出设计结果;确定了模拟不同张角时可变地球光阑相对应的位置和直径;对模拟器的关键部件热地球的机械结构设计结果进行了热力学分析;计算红外地球模拟器的出射光束平行度偏差,从理论上验证了设计的地球模拟器满足技术指标要求,可以作为红外地球敏感器地面测试用的标定设备。

### 参考文献:

- [1] Wang Lingyun, Wang Bo, Zhang Guoyu, et al. Ground attitude simulation light source technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2080-2086. (in Chinese)  
王凌云, 王博, 张国玉, 等. 地面姿态模拟光源技术研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2080-2086.
- [2] Zhang Guoyu, Zhang Fan, Xu Xiping, et al. Research on a miniature collimating infrared earth simulator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(3): 545-549. (in Chinese)  
张国玉, 张帆, 徐熙平, 等. 小型准直式红外地球模拟器研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(3): 545-549.
- [3] Sun Xiangyang, Fu Yuegang, Li Jie, et al. New star simulator based on  $\mu$ LED luminous technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0424002. (in Chinese)  
孙向阳, 付跃刚, 李杰, 等. 基于  $\mu$ LED 发光技术的新型星模拟器设计 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0424002.
- [4] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Liu Shi, et al. Design of high-precision variable star chart background star map simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (7): 2195-2199. (in Chinese)  
孙高飞, 张国玉, 刘石, 等. 高精度背景可控星图模拟器设计 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2195-2199.
- [5] Ermakov O I, Solovio I V, Strelehonok Y A. A new generation of the sun and earth sensors [C]//ESA Conference,

- 1997, WPP-129: 15-17.
- [6] Janz S J, Hilsenrath E, Flittner D, et al. Rayleigh scattering attitude sensor[C]//SPIE, 1996, 2831: 146-149.
- [7] Desrignes F, Doittau F X, Jamet J, et al. High accuracy static earth sensors [C]//1st ESA Conf on Attitude and Orbit Control Systems, 1977.
- [8] Shen Guoquan. Design and implementation of earth sensor for micro-satellite[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)  
沈国权. 面向微小卫星的地球敏感器的设计和实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [9] Cui Weixin, Dong Guanghui, Zhou Shibing, et al. Earth simulator for double cone scanning infrared horizon ground testing: China, CN1757566[P]. 2006-04-12. (in Chinese)  
崔维鑫, 童广辉, 周士兵, 等. 适合双圆锥扫描式红外地平仪地面检测用的地球模拟器: 中国, CN1757566[P]. 2006-04-12.
- [10] Wen Bangchun. Mechanical Design Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 799-981. (in Chinese)  
闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 799-981.
- [11] Meng Yao, Zhang Guoyu, Sun Gaofei, et al. Optical system design of high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 511-520. (in Chinese)  
孟遥, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于硅基液晶拼接的高对比度动态星模拟器光学系统 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(3): 511-520.
- [12] Sun Jun, Zhang Shijie, Li Baohua. Autonomous navigation based on star light and ultraviolet earth sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1192-1198. (in Chinese)  
孙俊, 张世杰, 李葆华. 利用地球紫外和恒星可见光的卫星自主导航[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1192-1198.